

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 4-1

위성 관측 자료 기반 국내 CO₂ 변동성에 대한 식생 활동과 인위적 배출원의 영향

김나래, 이형주

포항공과대학교 환경공학부

이산화탄소(CO₂)는 지구 온난화를 유발하는 대표적인 온실가스로, 2024년 전지구 평균 농도는 약 422.8 ppm에 달하며 산업화 이후 꾸준히 증가해 왔다. 이에 따라 CO₂ 배출 저감을 위한 국제적인 노력이 활발히 진행되고 있다. 우리나라의 CO₂ 배출량은 세계 평균보다 높은 수준에 속해, 감축 노력이 더욱 절실한 상황이다. CO₂는 주로 산업 활동 등 인위적 배출원에서 발생하지만, 토양과 식생을 통해 흡수되기도 한다. 효과적인 CO₂ 감축을 위해서는 농도 변화에 대한 지속적인 감시와 함께 배출원과 흡수원의 기여를 종합적으로 이해하는 것이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 위성 관측 자료를 활용하여, 국내 CO₂ 농도 변동성에 대한 식생 활동과 인위적 배출의 상대적 영향을 정량적으로 비교하였다. CO₂ 농도는 OCO-2(Orbiting Carbon Observatory-2)의 연직건조 공기물분율(XCO₂) 자료를 사용하였으며, 식생 활동을 나타내는 지표로는 TROPOMI(TROPospheric Monitoring Instrument)의 태양유도엽록소형광(SIF, Solar-Induced Fluorescence) 자료, 인위적 배출 지표로는 TROPOMI의 일산화탄소(CO) 자료를 사용하였다. 또한, CO₂의 장기 추세를 반영하기 위해 선형 시간 변수를 예측변수로 포함하였다. SIF는 식생의 광합성 활동을 반영하는 지표로, 식생에 의한 탄소 흡수 효과를 간접적으로 추정할 수 있다. 분석에는 2018년 5월부터 2022년 4월까지의 자료를 10km 격자 단위로 일별 평균하여 사용하였으며, 예측변수와 종속변수 간 관계의 일별 변동성을 고려한 혼합효과 통계모형을 적용하였다. 그 결과, SIF가 1 표준편차 증가 시 CO₂ 농도는 약 0.12 ppm 감소하는 경향을 보였으며, CO는 1 표준편차 증가 시 CO₂를 약 0.76 ppm 증가시키는 것으로 나타나, 인위적 배출이 식생보다 CO₂의 변동성에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 다만, SIF의 고정효과는 통계적으로 유의하지 않았으며($p = 0.19$), 이는 일별 관계의 변동성이 크게 작용했기 때문으로 해석된다. 모델의 교차검증 기반 결정계수(CV R²)는 0.94로 높은 설명력을 나타내어, 제안된 모형이 CO₂ 농도 변동성을 정량적으로 설명하는 데 적합함을 확인하였다.

Keywords: 인공위성 원격탐사, 온실가스 감시, 이산화탄소, 혼합효과모형, 배출원 추적

※ 이 연구는 기상청 「기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발 사업」(RS-2024-00404365)의 지원으로 수행되었습니다.

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 4-2

항공관측을 통한 겨울철 동아시아 브라운카본 분포 특성과 기후변화 영향 평가

주태규¹, 박희선¹, Haiyan Jin¹, 김나연¹, 김지훈¹, 민희성¹, 우재경¹,
김주애¹, 이미혜¹, Jack Dibb²

¹고려대학교 지구환경과학과

²University of New Hampshire

동아시아의 대기질은 계절에 따라 뚜렷하게 변하며, 특히 겨울철은 낮은 기온, 건조한 조건, 강한 바람이 특징적이다. 이 과정에서 양의 복사강제력을 가지는 유기탄소 에어로졸인 브라운카본(Brown carbon)은 빈번한 산불과 함께 장거리 이동하며 광역적인 기후 패턴에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 2024년 겨울철 ASIA-AQ 캠페인 기간 동안 한국, 필리핀, 태국에서 항공 관측을 수행하여 겨울철 브라운카본의 분포 특성을 조사하였다. NASA DC-8 비행기는 한국, 필리핀, 태국 상공에 각각 5회, 4회, 4회 비행하였으며, PM_{2.5} 샘플은 90 mm 석영 및 테플론 필터에 포집되었다. 이후 LWCC-UV-Vis 분광법을 적용하고, 물-메탄올 연속 추출을 통해 용매에 따른 브라운카본 분포 특성을 비교하였다. 브라운카본의 지표인 365 nm에서의 흡광 계수(Abs₃₆₅)를 산정한 결과, 수용성 브라운카본은 태국(6.4 Mm⁻¹)에서 가장 높았으며, 필리핀(2.3 Mm⁻¹)과 한국(2.0 Mm⁻¹)에서는 상대적으로 낮게 나타났다. 또한 평균 흡광 옴스트롬 지수(AAE, Absorption Angstrom Exponent)는 태국에서 7로, 한국과 필리핀(AAE = 6)보다 높게 나타나 브라운카본의 산불 영향 가능성이 태국에서 더 높음을 시사하였다. 성분 분석 결과, 유기 에어로졸이 전체 PM_{2.5}의 34 – 65%를 차지하였고, 무기성분의 경우 한국은 질산염(NO₃⁻, 23%), 태국은 황산염(SO₄²⁻, 14%)이 우세하였다. 특히 Abs₃₆₅와 K⁺의 높은 상관계수(r=0.8)는 브라운카본의 주요 배출원이 산불임을 시사하였다. 브라운카본의 기후 영향 가능성을 평가하기 위해 단순복사강제력효율(Simple Forcing Efficiency, SFE)를 산출하였고, 필리핀(6.9 W·g⁻¹·nm⁻¹), 한국(4.7 W·g⁻¹·nm⁻¹), 태국(4.0 W·g⁻¹·nm⁻¹) 순으로 나타나 브라운카본의 질량 대비 복사강제력 상승 효과는 흡광 계수와는 다르게 나타나는 경향을 보여, 브라운카본을 구성하는 물질이 국가별로 다를 수 있음을 암시하였다. 본 연구 결과는 아시아 지역의 브라운카본 분포와 성분 특성을 규명함으로써 대기질 개선 및 기후변화 대응을 위한 과학적 근거와 정책 전략 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 브라운카본, 항공측정, 단순복사강제력효율, 유기탄소, 기후변화

동아시아 지역 규모 CO₂ 변동성과 기온 연계성 평가

강예리¹, 김용희¹, 송창근^{1,2,3}

¹울산과학기술원 탄소중립대학원
²울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
³동남권 미세먼지 연구·관리 센터

동아시아는 전 지구 평균 이상의 CO₂ 농도와 뚜렷한 계절 변동성을 보이는 지역으로, 농도 상승과 시공간적 이질성이 지역 기온에 미치는 영향의 정량적 평가가 중요하다. 그러나 현행 대기화학수송모델은 CO₂ flux를 추적자(tracer)로 취급하여 기상 피드백을 직접 반영하지 못하고, 지역 규모 기상모델(WRF) 역시 물리 매개변수화, 공간 상세화에 따른 계산비용 제약으로 온실가스를 일정값으로 처방해 온 한계가 있다. WRF v4.4에서 SSP 시나리오 또는 연평균 농도 입력이 일부 복사 스킴에 도입되었으나, 이는 여전히 평균장 중심이며, 일변화는 보간 수준으로 처리되어 제한적이다.

본 연구는 이러한 공백을 보완하기 위해, 대기화학수송모델 GEOS-Chem을 활용하여 전 지구 규모의 CO₂ 농도를 모의한 뒤, 동아시아 영역으로 상세화하여 농도장을 산출하였다. 이를 기상모델 WRF의 복사전달 모듈(RRTMG)에 일변화 형태로 처방하였다. 동일한 역학·물리조건 하에서 (i) 대조(CTRL): 평균장(연평균/시나리오) CO₂ 처방과, (ii) 실험(DIUR): 일변화 CO₂ 처방을 구성하여, 두 실험 간 복사 강제력 기여를 분리·평가하였다. 평가 지표는 지표 에너지 수지, 지면 기온 등으로 정의하였다. 초기 분석 결과, 단기간 CO₂ 변동성으로도 유의미한 복사 강제력 신호를 보이며, 이는 지표 에너지 수지와 기온 변동을 통해 지역 기온 반응으로 연결될 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 동아시아 지역에서의 CO₂-기상 연계 효과를 정량적으로 평가함으로써, 향후 온실가스 감축 정책과 지역 기후위기 대응 전략 마련을 위한 과학적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

Keywords: 동아시아, CO₂ 변동성, 복사 강제력, 기온 반응, 지역 규모

※ 이 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2025-00522393).

대기 역모델링 기반 한중일 국가 탄소 배출량 추정

배연, 정수종

서울대학교 환경대학원

한중일은 아시아 내 경제 규모와 인구가 큰 국가로서 이들의 탄소 배출량이 지역 및 전 지구적 탄소 수지와 기후 변화에 중대한 영향을 미친다. 기존 통계 기반 배출량 산정의 불확실성을 보완하고, 다양한 배출원 및 흡수원을 통합적으로 평가하는 대기 역모델링은 동아시아 지역 국가별 탄소 배출량 평가와 온실가스 감축 정책 수립에 필수적이다. 특히 대기 중 이산화탄소 농도 관측 데이터를 활용한 역모델링은 IPCC 2019 개선보고서에서 국가 온실가스 배출 인벤토리의 품질 보증 및 검증 수단으로 권고한 바 있다. 본 연구에서는 GEOS-Chem Adjoint 모델을 활용하여 한중일 국가별 탄소 배출량을 추정하고, 동아시아 국가 탄소 배출량 산정에 적합한 공간 및 시간 해상도를 평가하였다. 산정된 인위적 탄소 배출량은 CEOS 위성 관측 기반 국가 배출 추정치와 비교 시, 한국과 일본은 다소 낮고 중국은 다소 높게 산정되었으나 전체 차이는 5% 이내였다. 국가별 공식 인벤토리 보고서(National Inventory Report, NIR)와 비교할 때는 한국과 일본은 각각 약 1%, 7% 높게 산정되었고 중국은 15% 이상 높게 계산되었다. 이러한 결과는 대기 역모델링 기반 추정이 각국 인벤토리의 불확실성을 검증하고 보완하는 데 유용한 도구로 사용될 수 있음을 시사한다. 본 연구에서는 또한 역모델링을 활용하여 자연 흡수량을 보정하고 인위적 배출량 자료에 더해 국가 탄소 순배출량을 보다 정확히 산정하였다. 이를 통해 역모델링 시스템을 활용하면 대기 중 이산화탄소 변화에 대한 자연적 및 인위적 기여를 분리할 수 있고, 국가 단위 탄소 수지 평가의 신뢰성을 한층 강화할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 대기 역모델링을 통한 국가 단위 탄소 플럭스 추정이 동아시아 기후 및 탄소 순환 연구에 기여할 수 있는 방법론적 근간임을 시사하며, 추정 정확도 향상을 위해 다양한 관측 자료의 통합과 역모델링 시스템의 지속적 최적화가 필요함을 강조한다.

Keywords: 대기 역모델링, 국가 온실가스 인벤토리, 한중일 탄소 배출량, 이산화탄소 순배출량, GEOS-Chem Adjoint

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00232066).

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 4-5

대기 중 이질 반응 (Heterogeneous reaction) 기반 아질산 (HONO) 생성 특성 규명 및 도시 대기질 영향 정량 평가

길준수^{1,2}, 이미혜¹, 임세희³, 박문수⁴, 최원식⁵, 윤창동¹, 이현민¹, 안준영⁶, 최유리⁷

¹고려대학교 지구환경과학과

²고려대학교 기초과학연구원

³충남대학교 환경공학과

⁴세종대학교 기후환경융합학과

⁵부경대학교 환경대기학과

⁶국립환경과학원 대기환경연구부

⁷서울시보건환경연구원

아질산 (HONO)은 이른 오전 시간 광화학 반응을 통해 대기 중 수산화라디칼 (OH)을 공급하며, 휘발성 유기화합물 (Volatile Organic Compounds; VOCs)의 산화를 촉진하여 최종적으로 주간 오존 (O₃) 농도를 증가시키는 중요한 물질로 알려져 있다. 또한 생성된 OH의 일부는 이산화질소 (NO₂)와 반응하여 질산 (HNO₃)을 형성하며, 이를 통해 입자상 질산염 (NO₃⁻) 증가에도 기여할 수 있다. 이러한 중요성에도 불구하고 HONO의 생성 메커니즘은 이질반응 (heterogeneous reaction)의 복잡성으로 인해 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았다.

본 연구에서는 2021년 10월~11월 SIJAQ 캠페인 기간 서울시 성북구 고려대학교에서 MARGA를 활용하여 HONO를 관측하였고, HONO 전구체 및 대기오염물질을 포함한 종합 관측을 수행하였다. 관측자료를 기반으로, 이질 반응을 포함하는 0차원 상자 모델 (FOAM)을 활용하여 관측된 HONO 농도의 모사를 수행하였다.

전체 측정 기간 HONO의 평균 농도는 1.33 ppbv였으며 최대 6.59 ppbv까지 상승하였다. HONO 농도는 전구체인 NO₂ 및 상대습도의 변화와 비례하는 경향을 보였다. PM_{2.5} 고농도 사례일을 기준으로 입자상 물질의 변화에 따른 HONO 생성-소멸기작에 대한 분석을 수행하였으며, 이를 통해 HONO 이질생성 기작의 핵심 요소는 에어로졸 표면의 NO₂ 흡착 계수 (uptake coefficient)임을 확인하였고, 이를 결정하는 인자로 블랙카본 (BC)의 물리적 특성을 제시하였다.

최종적으로 HONO의 생성-소멸 특성을 고려하여 in-situ에서 생성되는 총 질산염 (TNO₃ = HNO₃ + pNO₃⁻)의 양을 산정하였다. 계산된 TNO₃의 농도는 관측값의 20% 미만이었으며, PM_{2.5} 고농도 사례 시 비중이 감소하였다. 이는 HONO가 도시지역에서 in-situ NO₃⁻ 형성의 지표 역할을 할 수 있음을 시사한다.

Keywords: HONO, heterogeneous reaction, box model, NO₂ uptake coefficient, BC

기상분야 국가기술자격 종목 신설을 위한 제도적 기반 조성

김수희, 한선호, 방철한, 전수현, 강래형

한국기상산업기술원 산업지원본부 산업정책실

우리나라의 기상관측망은 기상청을 비롯한 국가기관, 지자체, 공공기관 등 28개 기관에 의해 운영되고 있으며, 「기상관측표준화법」에 따라 관리되는 관측시설만 5천4백여 개소에 달한다. 최근 기후변화의 심화로 농업, 에너지 관리 등 다양한 목적의 관측 수요가 늘어나면서 기상관측망은 더욱 조밀화되고 있으며, 이에 따라 안정적인 관측망 조성과 기상정보의 신뢰성 확보가 중요한 과제로 부상하고 있다. 이러한 여건 속에서 기상장비를 관리하는 전문 인력의 역량을 제도적으로 보장하는 것은 필수적이다.

이에 기상청과 한국기상산업기술원은 기상장비 관리 인력의 전문성을 제고하기 위해 국가기술자격 종목 신설을 추진하고 있다. 본 연구는 제도적 기반 조성을 위해 직무분석을 수행하였으며, 선행연구를 토대로 직무분류체계 초안을 마련한 뒤, 산업 전문가를 대상으로 한 직무조사 워크숍과 인터뷰를 통해 직무정보를 검증·보완하여 최종 직무분류체계를 확정하였다.

기상장비 관리 직무는 ‘관측환경 개선 및 시설관리’, ‘기상장비 점검 및 유지보수’, ‘오류 진단 및 문제 해결’, ‘장비 교체 및 업그레이드 관리’, ‘장비 운영 모니터링 및 실시간 데이터 관리’ 등 다섯 가지 영역으로 구분된다. 이는 단순한 현장 운영을 넘어 시설 개선, 고장 원인 분석, 실시간 장애 대응 등 고도화된 기술력과 문제 해결 능력을 요구하는 전문 직무로, 정확한 기상예보와 국민의 생명·안전과 직결되는 중요한 영역이다.

본 발표는 기상장비 관리 직무에 대한 국가기술자격 종목 신설의 필요성과 제도적 기반 마련 과정을 소개하고, 이를 통해 전문 인력 양성 체계 구축과 기상관측정보 품질 제고를 위한 제도적 방안을 제안하고자 한다. 이러한 논의를 공유함으로써 기상산업 인력의 전문성을 확보하고, 나아가 국가 기상산업 정책의 발전에도 기여할 수 있기를 기대한다.

Keywords: 기상장비, 국가기술자격, 기상산업정책

※ 이 연구는 한국기상산업기술원 기상산업활성화 사업과 연계하여 수행되었습니다.